

PROGRAMA PARA CÁLCULO DE CAPACIDADE DE CARGA E DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE ESTACAS

Laedson Silva Pedreira¹

Thiago Mendonça Pacheco²

Resumo

Este trabalho apresenta uma solução computacional amigável, confiável e acessível de qualquer lugar com conexão à internet, capaz de tornar prático o cálculo da estimativa de capacidade de carga em estacas (atrito lateral, ponta e admissível), por meio das formulações semiempíricas propostas por Aoki-Velloso (1975) e Décourt e Quaresma (1978), visto que utilizam os resultados das sondagens a percussão (com a realização do SPT), sendo a investigação geotécnica mais difundida e realizada no Brasil. Ainda, este programa dimensiona estruturalmente as estacas de concreto, no que tange a seus aspectos de resistência aos esforços de compressão e tração.

Palavras-chave: Capacidade de carga; Estacas; Dimensionamento; Software.

Abstract

This paper presents a friendly computing solution, reliable and accessible from anywhere with an internet connection, able to make practical calculation of the estimated load capacity piles (lateral friction, toe or admissible), through formulations semi empirical proposed by Aoki -Velloso (1975) and Décourt and Quaresma (1978), as using the results of surveys percussion (to the implementation of SPT), the most widespread geotechnical investigation and held in Brazil. Still, this program assesses the structural concrete piles, with respect to aspects of resistance to compression and tensile stresses.

Keywords: Capacity of load capacity; Piles; Design; Software.

1 INTRODUÇÃO

Grande parte das cargas atuantes em uma edificação é vertical, isto é, dirigidas para o centro da Terra. O estudo das cargas é de essencial relevância para o dimensionamento de uma edificação, pois as mesmas determinarão os esforços atuantes em uma estrutura.

Responsáveis por transferir essas cargas ou forças provenientes da superestrutura para o solo, as fundações são elementos estruturais indispensáveis em qualquer projeto de edificações.

Uma vez que a magnitude das cargas nas estruturas e a intrepidez dos profissionais aumentam gradativamente com o passar dos anos, a Engenharia de Fundações vem especializando-se no estudo destes elementos, com a tarefa de solucionar os problemas de fundações em estacas solicitadas por carregamentos verticais, associados com esforços transversais. Ainda cabe ressaltar os desafios encontrados pelos engenheiros nas tarefas de

¹ Aluno da UNIFACS. E-mail: laedsonsilva@hotmail.com

² Professor da UNIFACS. Mestrado em engenharia civil pela Universidade Estadual de Feira de Santana. E-mail: thiago.ecivil@hotmail.com

mensurar e avaliar as propriedades do solo, de maneira a verificar o seu comportamento na interação com o elemento estrutural.

Com características e propriedades tão voláteis, em virtude da imensa gama de variáveis compreendidas na composição física, química de um solo, tem-se uma grande dificuldade de reproduzir analítica e numericamente o mecanismo de interação entre a estaca e o solo.

Na busca de uma previsão numérica para resolução dos problemas de capacidade de cargas em fundações, foram desenvolvidos métodos baseados em formulações empíricas a partir de resultados *in situ* e ajustados com provas de carga. De acordo com Décourt e outros (1996), no Brasil, predomina o uso dos métodos semiempíricos, sendo que os mais conhecidos são os de Aoki-Velloso (1975) e de Décourt-Quaresma (1978).

Neste contexto, busca-se apresentar uma ferramenta computacional que agilize o cálculo de estacas, dando ao projetista mais tempo para análise e avaliação de eficiência, área em que sua atenção é indispensável, a fim de abordar o efeito dos carregamentos, descrevendo os métodos de cálculo para previsão de esforços, destacando-se os seguintes aspectos:

a) Capacidade de carga do solo: implementação computacional das formulações empíricas correlacionadas com o SPT (*Standard Penetration Test*), amplamente utilizadas nos escritórios de projetos de fundações. Com isso, busca-se verificar a capacidade de suporte do maciço de solo, com segurança, em relação às tensões transmitidas pelas estacas.

b) Dimensionamento estrutural da estaca: cálculo das propriedades geométricas e da armadura, para estaca de concreto, necessário para que o elemento estrutural sustente os esforços internos solicitados por cargas de tração e compressão.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Toda edificação, por mais elementar que seja, requer componentes estruturais com a função de transmitir as cargas acumuladas pela superestrutura para o maciço de solo. Esses elementos são denominados de fundações.

Conforme Velloso e Lopes Velloso e Lopes (2010), convencionou-se, que as fundações são divididas em dois grupos: fundações superficiais (ou “diretas”, ou rasas) e fundações profundas (ou “indiretas”).

O conceito de fundação profunda, objeto de estudo neste trabalho, é estabelecido pela NBR 6122 – Projeto e execução de fundações, que atesta o seguinte: elemento de fundação

que transmite o carregamento ao maciço de solo pela base (resistência de ponta) ou por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou por uma composição dos dois efeitos e que as bases estejam implantadas a uma profundidade superior a duas vezes sua menor dimensão e a pelo menos três metros de profundidade (ABNT, 2010). No grupo das fundações profundas estão inclusos as estacas, os tubulões e os caixões.

De acordo com Velloso e Lopes (2010), que apresentam uma classificação quanto à execução, as estacas são elementos de fundação profunda, executados por meio de ferramentas ou equipamentos, através do processo de cravação ou escavação, ou ainda, por meio dos dois, caracterizando-se como processo misto.

De maneira geral, o uso das estacas está relacionado com a capacidade de transmitirem cargas por meio de solos de baixa resistência mecânica, ou através de solos com a existência de água, até uma camada de solo resistente que garanta o apoio adequado (ALONSO, 2010).

2.1 Capacidade de carga

É preciso distinguir capacidade de carga em um elemento de fundação por estacas de sua resistência estrutural. Esta última é apenas a parcela calculada com base nas dimensões e no material da estaca (ALONSO, 2012).

Uma vez definida a capacidade estrutural da estaca, é necessário entender que uma estaca submetida a um carregamento vertical irá resistir a essa solicitação parcialmente pela resistência ao cisalhamento gerada ao longo de seu fuste e, parcialmente pelas tensões normais geradas ao nível de sua ponta (HACHICH, et al., 1998). A carga que leva à ruptura desse conjunto é denominada de capacidade de carga.

Desta forma, a capacidade de carga R é definida como a soma das cargas máximas que podem ser suportadas pelo atrito lateral R_L e pela ponta R_P . Pode-se então calcular a capacidade de carga de uma fundação profunda tipo estaca, de acordo com a Equação 1.

$$R = R_L + R_P \quad \text{Eq.[1]}$$

Onde:

R = capacidade de carga de ruptura

R_L = capacidade de carga por atrito lateral

R_P = capacidade de carga de ponta

Para obtenção da capacidade de carga de ponta (R_p), multiplica-se a resistência unitária de ponta (r_p), pela área da seção da ponta ou base da estaca (A_p) (CINTRA; AOKI, 2010).

$$R_p = r_p \cdot A_p \quad \text{Eq.[2]}$$

A capacidade de carga do atrito lateral (R_L) é obtida ao realizar-se o somatório das forças resistentes unitárias por atrito lateral (r_L) vezes a camada de solo de espessura (Δ_L), multiplicando-se pelo perímetro do fuste (CINTRA; AOKI, 2010). Desta forma, tem-se:

$$R_L = U \cdot \Sigma(r_L \cdot \Delta_L) \quad \text{Eq.[3]}$$

A capacidade de carga pode ser obtida por meio de métodos estáticos, dinâmicos ou provas de carga. Os métodos estáticos podem ser racionais ou teóricos e métodos semiempíricos de transferência de cargas.

Os métodos semiempíricos para cálculo de capacidade de carga, na sua maioria, fazem uso de coeficientes empíricos, que ajustam as suas equações para os mais variados tipos de solo que as estacas atravessam, bem como para o tipo de estaca (ARAUJO; WOLLE, 2006).

No Brasil, há muito tempo, os profissionais de fundações têm a preocupação de estabelecer métodos de cálculo da capacidade de carga de estacas, utilizando os resultados das sondagens a percussão (com a realização do SPT), visto que a mesma é a investigação geotécnica mais difundida e realizada no país (VELLOSO; LOPES, 2010).

Dentre os métodos semiempíricos utilizados no país estão os desenvolvidos por Aoki-Velloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978).

2.1.1 Método de Aoki-Velloso (1975)

O método de Aoki e Velloso (1975) foi idealizado a partir de um estudo comparativo entre resultados de prova de carga em estacas com resultados de ensaio de penetração de cone (CPT). Subsequente, com o intuito de aplicar o método com os resultados de ensaio SPT, foi implementado o fator “k”, que transforma a resistência de ponta do cone para N_{SPT} (LOBO, 2005). A expressão para carga última é representada pela Equação 4.

$$R = A_p r_p + U \sum (r_L \Delta l) \quad \text{Eq.[4]}$$

Onde:

A_p = área da seção transversal da estaca.

U = perímetro da estaca.

Δl = segmento da estaca que está sendo calculado.

$$r_p = \frac{k N}{F1} \quad \text{Eq.[5]}$$

$$r_L = \frac{\alpha k N}{F2} \quad \text{Eq.[6]}$$

Desta forma:

$$R = A_p \frac{k N_p}{F1} + U \sum \frac{\alpha k N_L}{F2} \Delta l \quad \text{Eq.[7]}$$

Os valores de N_p e N_L são, respectivamente, o valor do índice de resistência à penetração (valor do SPT) na cota de apoio da ponta da estaca e o índice de resistência à penetração médio na camada de solo de espessura Δl (CINTRA; AOKI, 2010).

Os fatores $F1$ e $F2$ são fatores de correção que consideram o efeito escala, ou seja, a discrepância de desempenho entre a estaca (protótipo) e o cone do CPT (modelo), e também a influência do processo de execução de cada tipo de estaca. Os coeficientes k e α são função do tipo de solo (CINTRA; AOKI, 2010). São expostos na Tabela 1 os valores de k e α , na Tabela 2 os valores de $F1$ e $F2$, inicialmente propostos por Aoki-Velloso (1975).

Tabela 1- Coeficiente K e razão de atrito α .

Solo	K (MPa)	α (%)
Areia	1	1,4
Areia siltosa	0,80	2
Areia siltoargilosa	0,70	2,4
Areia argilossiltosa	0,50	2,8
Areia argilosa	0,60	3
Silte arenoso	0,55	2,2
Silte arenoargiloso	0,45	2,8
Silte	0,40	3
Silte argiloarenoso	0,25	3
Silte argiloso	0,23	3,4
Argila arenosa	0,35	2,4
Argila arenossiltosa	0,30	2,8
Argila siltoarenosa	0,33	3
Argila siltosa	0,22	4

Fonte: Cintra e Aoki (2010).

Tabela 2 - Fatores de correção $F1$ e $F2$.

Tipo de Estaca	F1	F2
Franki	2,5	5,0
Metálica	1,75	3,5
Pré-moldada	1,75	3,5

Fonte: Cintra e Aoki (2010).

De acordo com Cintra e Aoki (2010), alguns aprimoramentos foram realizados nos fatores de correção F1 e F2. Para as estacas pré-moldadas de pequeno diâmetro, constatou-se que o método é conservador demais e propõe:

$$F1 = 1 + \frac{D}{0,80} \quad \text{Eq.[8]}$$

D = diâmetro ou lado da seção transversal em metros

Nos valores de F2 manteve-se a relação $F2 = 2 F1$. Para as estacas do tipo raiz, hélice contínua e ômega, Velloso e Lopes (2002) recomendam $F1 = 2$ e $F2 = 4,0$ (CINTRA; AOKI, 2010). Esses valores são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Fatores de correção F1 e F2 atualizados.

Tipo de Estaca	F1	F2
Franki	2,5	2F1
Metálica	1,75	2F1
Pré-moldada	$1 + D/0,80$	2F1
Escavada	3,0	2F1
Raiz, Hélice contínua e Ômega	2,0	2F1

Fonte: Cintra e Aoki (2010).

2.1.2 Método de Décourt-Quaresma (1978)

O método semiempírico de Décourt-Quaresma (1978) apresenta um processo de avaliação de capacidade de carga de estacas, baseado somente nos valores N do ensaio SPT. Esse método, originalmente previsto para estacas pré-moldadas de concreto, foi objeto de algumas extensões, objetivando a adequação para demais tipos de estacas (HACHICH, et al., 1998). A expressão para carga última é representada pela equação abaixo.

$$R = A_p r_p + U r_L L \quad \text{Eq.[9]}$$

Onde:

A_p = área da seção transversal da estaca.

U = perímetro da estaca.

L = segmento da estaca que está sendo calculado.

$$r_p = \alpha C \bar{N}_p \quad \text{Eq.[10]}$$

$$r_L = 10 \beta \left(\frac{\bar{N}_L}{3} + 1 \right) \quad \text{Eq.[11]}$$

Desta forma:

$$R = \alpha C \bar{N}_p + U 10 \beta \left(\frac{\bar{N}_L}{3} + 1 \right) L \quad \text{Eq. [12]}$$

N_p consiste no valor médio do índice de resistência à penetração na ponta da estaca, calculado através da média de três valores: o correspondente ao nível da ponta ou base, o imediatamente anterior e o imediatamente posterior. O N_L é expresso como o valor médio do índice de resistência à penetração do SPT ao longo fuste (CINTRA; AOKI, 2010).

Os valores de α e β , são propostos por Décourt e outros (1996), e são coeficientes de majoração ou de minoração, respectivamente, para a reação da ponta e para o atrito lateral unitário, que permitem estender os cálculos efetuados para a estaca padrão e para outros tipos de estaca (HACHICH, W. et al., 1998). São expostos nas tabelas 4, 5 e 6 os valores de C, α e β respectivamente.

Tabela 4 - Coeficientes característicos do solo C

Tipo de solo	C (KPa)
Argila	120
Silte argiloso (solos residuais)	200
Silte arenoso (solos residuais)	250
Areia	400

Fonte: Cintra e Aoki (2010).

Tabela 5 - Coeficiente α em função do tipo de estaca e do tipo de solo

Tipo de solo	Tipo de estaca					
	Cravada	Escavada (em geral)	Escavada (com bentonita)	Hélice contínua	Raiz	Injetadas (alta pressão)
Argilas	1,0	0,85	0,85	0,30	0,85	1,0
Solos residuais	1,0	0,60	0,60	0,30	0,60	1,0
Areias	1,0	0,50	0,50	0,30	0,50	1,0

Fonte: Quaresma e outros (1996).

Tabela 6 - Coeficiente β em função do tipo de estaca e do tipo de solo

Tipo de solo	Tipo de estaca					
	Cravada	Escavada (em geral)	Escavada (com bentonita)	Hélice contínua	Raiz	Injetadas (alta pressão)
Argilas	1,0	0,85	0,90	1,0	1,5	3,0
Solos residuais	1,0	0,65	0,75	1,0	1,5	3,0
Areias	1,0	0,50	0,60	1,0	1,5	3,0

Fonte: Quaresma e outros (1996).

Para as estacas pré-moldadas, metálicas e tipo Franki, α e β permanecem 1, como o da proposição inicial (CINTRA; AOKI, 2010).

2.2 Capacidade de carga admissível

Usualmente, define-se como admissível a carga obtida a partir da aplicação de um coeficiente de segurança com valor igual a dois em relação à carga de ruptura de um elemento estrutural. Outra tendência é admitir coeficientes de segurança diferentes para o atrito lateral e para a carga de ruptura de ponta (HACHICH, et al., 1998). Para obtenção da carga admissível, tem-se genericamente:

$$\text{Carga admissível} = \frac{\text{Carga de ruptura}}{\text{fator de segurança}} \quad \text{Eq. [13]}$$

O método de Aoki-Velloso (1975) utiliza o fator de segurança recomendado pela NBR 6122 (ABNT, 2010), sendo a carga admissível a metade do valor da capacidade de carga de ruptura da estaca.

$$R_{adm} = \frac{R_L + R_P}{2} \quad \text{Eq. [14]}$$

Já o método de Décourt-Quaresma pode admitir coeficientes de segurança diferentes para o atrito lateral e para a carga de ruptura de ponta. Sendo os valores 1,3 e 4,0 correspondentes ao fator de segurança da carga por atrito lateral e carga de ponta, respectivamente (VELLOSO; LOPES, 2010).

$$R_{adm} \leq \begin{cases} \frac{R_P}{4,0} + \frac{R_L}{1,3} \\ \frac{R_L + R_P}{2} \end{cases} \quad \text{Eq. [15]}$$

A NBR 6122 estabelece que para as estacas escavadas, a carga admissível deve ser no máximo 1,25 vezes a resistência do atrito lateral calculada na ruptura, ou seja, no máximo 20% da carga admissível pode ser suportada pela ponta da estaca. Quando o valor da ponta for superior, o processo executivo de limpeza da ponta deve ser especificado pelo projetista e ratificado pelo executor. (ABNT, 2010).

$$P_{adm} \leq 1,25 \cdot R_L$$

Eq.[16]

2.3 Dimensionamento estrutural de estacas de concreto

O dimensionamento dos trechos em que a estaca sofre esforços de compressão, tração, flexão, torção ou cortante deve ser realizado de acordo com o disposto na norma NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto (para o caso de estacas em concreto), adotando-se os valores para resistência característica do concreto e os coeficientes de majoração das cargas e minoração das resistências, indicados naquela norma e na NBR 6122. (ALONSO, 2012).

Para o dimensionamento, utilizar-se-á os valores da capacidade de carga de uma estaca, adotando o menor valor entre a resistência estrutural do material da estaca e a resistência do solo que lhe dá suporte.

2.3.1 Dimensionamento na compressão

Uma peça ou estaca de concreto, considerada axialmente comprimida, cuja força normal de cálculo é N_d , conforme Eq.17, tem seu esforço equilibrado pela resistência da seção que tem duas parcelas; a primeira é a força necessária para esgotar a parcela de resistência à compressão do concreto e a segunda é para levar a armadura a um encurtamento relativo a 2% (POLILLO, 1981).

De acordo com a NBR 6122, as estacas ou tubulões quando solicitados à carga de compressão e tensões aos valores da tabela 4 do item 8.6.3 desta norma, podem ser executadas em concreto não armado, exceto quanto à armadura de ligações com bloco. Os elementos com solicitações que resultem em tensões superiores às indicadas na tabela 4 devem ser armados, e seu dimensionamento é prescrito pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

Para este trabalho, foram admitidas as seguintes particularidades na determinação da capacidade resistente da estaca:

- a) A ruptura não ocorrerá por flambagem;
- b) As estacas estão totalmente enterradas;
- c) A força de compressão é perfeitamente centrada;
- d) Em virtude das particularidades anteriores, os efeitos de segunda ordem e as excentricidades acidentais são desconsiderados.

Desta forma, de acordo com Alonso (2012), o dimensionamento de peças comprimidas poderá ser feito com a seguinte equação:

$$N_d \left(1 + \frac{6}{h} \right) = 0,85 A_c \cdot f_{cd} + A'_s \cdot f_{yd} \quad \text{Eq.[17]}$$

em que:

A_c é a área da seção transversal comprimida;

A'_s é a área da armadura comprimida;

f_{cd} é a resistência de cálculo do concreto;

f_{yd} é a resistência de cálculo do aço;

N_d é a força normal de cálculo ($N_d = N \cdot \gamma_f$)

O coeficiente de majoração, não menor que 1.1, em que h , medido em centímetros, seja o menor lado do retângulo mais estreito circunscrito à seção da estaca, é dado pela Equação 18.

$$\left(1 + \frac{6}{h} \right) \quad \text{Eq.[18]}$$

A armadura mínima a adotar será de 0,5% A_c , no qual A_c é a área da seção transversal da estaca.

2.3.2 Dimensionamento na tração

As estacas sempre serão armadas para combater os esforços de tração, sendo a seção da armadura condicionada pela abertura máxima permitida para as fissuras (ALONSO, 2012).

De acordo com a NBR 6122, nas estacas submetidas à tração e/ou flexão deve ser feita a verificação de fissuração de forma a atender à NBR 6118.

De acordo com Alonso (2012), para este dimensionamento pode-se utilizar a fórmula simplificada.

$$w_k = \frac{\phi_i}{2 \cdot \eta_b - 0,75} \cdot \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \cdot \frac{3\sigma_{si}}{f_{ctm}} \quad \text{Eq.[19]}$$

Em que:

ϕ_i é o diâmetro da barra na região considerada;

η_b é o coeficiente de aderência;

σ_{si} tensão máxima atuante no aço tracionado para garantir a abertura prefixada das fissuras;

E_{si} é o módulo de elasticidade do aço, ou seja, 210.000 MPa;

f_{ctm} é a resistência característica média do concreto à tração.

De acordo com Alonso (2012), os valores de w_k são:

- 1 (um) para estacas não protegidas em meio agressivo (fissuras até 0,1 mm);
- 2 (dois) para estacas não protegidas em meio não agressivo (fissuras até 0,2 mm);
- 3 (três) para estacas protegidas (fissuras até 0,3 mm).

A armadura longitudinal mínima é estabelecida pelo item 17.3.5.3.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014) que indica que a armadura longitudinal mínima deve ser:

$$A_{s,min} = \left(0,15 \frac{N_d}{f_{yd}} \right) \geq 0,004 A_c \quad \text{Eq. [20]}$$

Em que:

$A_{s,min}$ é a área de armadura mínima;

N_d é a força normal de cálculo;

f_{yd} é a resistência de cálculo do aço;

A_c é a área de concreto na zona tracionada.

3METODOLOGIA

Os modelos de cálculo de capacidade de carga aqui utilizados foram baseados nas publicações de Aoki e Cintra (2010), Velloso e Lopes (2010), Hachich e outros (1998) e nas recomendações na NBR 6122/2010. A marcha de cálculo para dimensionamento estrutural seguiu a teoria exposta por Alonso (2012).

Definido o modelo matemático e estabelecidas as hipóteses de cálculo e seus limites de validade, desenvolveu-se um programa utilizando uma plataforma WEB com linguagem de programação PHP e Banco de Dados MySQL.

O software foi construído, utilizando-se seis estágios ou processos para o desenvolvimento de programas: levantamento de requisitos, análise de requisitos, projeto, implementação, testes e implantação.

As fases de levantamento e análise de requisitos consistem nas tarefas de investigar e definir o escopo do software, ou seja, elucidam-se as funcionalidades do programa.

O projeto consiste em um prolongamento do modelo de análise, aspirando à implantação no computador. Nesta etapa, definiu-se o design e o esquema do Banco Dados.

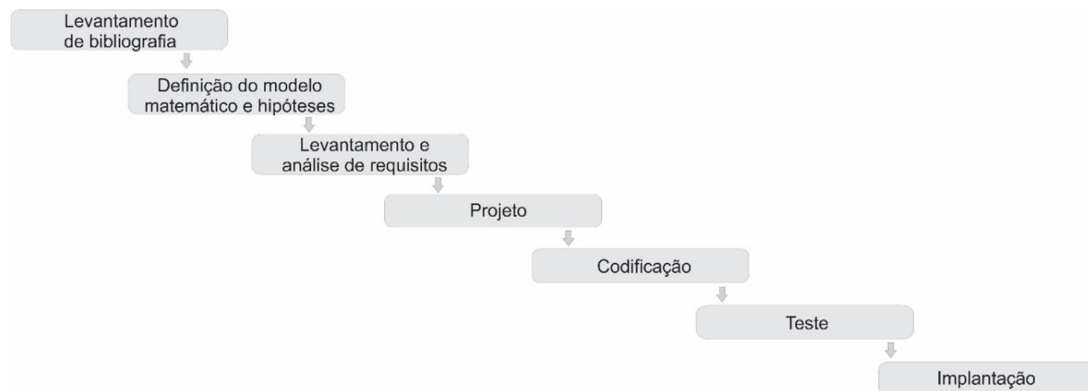
Na implementação tem-se a escrita do código propriamente dito. Neste momento, as formulações matemáticas estudadas são transcritas em códigos. Antes, porém, é desenvolvido o Banco de Dados utilizado pelo sistema.

Após a finalização do desenvolvimento do programa, aplicam-se os testes de validação. A validação foi realizada comparando-se os resultados do software com as soluções de capacidade de carga e dimensionamento estrutural apresentadas por Ferreira e otros (2014) e Alonso (2012), respectivamente. A fase de implantação consistiu em tornar o programa acessível na internet por meio do endereço eletrônico www.fundamentumengenharia.com.br.

Como base para montagem e elaboração da pesquisa, foram utilizados os trabalhos de Gil (2012) e Marconi e Lakatos (2003).

Desta forma, buscou-se desenvolver um software que inove e torne prático o cálculo de capacidade de carga por meio de formulações semi-empíricas, bem como o dimensionamento de estacas solicitadas por carregamentos verticais, contribuindo para a difusão destas técnicas, muitas vezes evitadas pelos profissionais, por tratar-se de um dimensionamento trabalhoso e complexo.

Figura 1 - Sequência de desenvolvimento.



4 APRESENTAÇÃO DO PROGRAMA

Para o desenvolvimento do programa se antepôs a utilização da plataforma WEB com a linguagem de programação PHP e Banco de Dados MySQL, pelo fato das inúmeras vantagens que esse conjunto confere.

A linguagem de programação PHP é gratuita e de fácil aprendizado. Uma de suas grandes vantagens é que ela é multiplataforma, ou seja, o PHP funciona em qualquer plataforma onde for possível a instalação de servidor Web. É linguagem cliente-servidor, robusta e pode ser integrada de maneira fácil a quase todos os bancos de dados usados na atualidade.

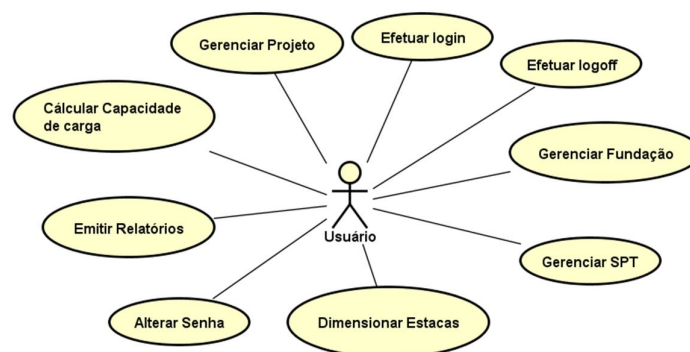
Além do PHP, utilizou-se HTML (*HyperText Markup Language*), CSS (*Cascading Style Sheets*) e JavaScript. O HTML trata-se de uma linguagem de marcação que permite apresentar informação na Internet, de acordo com uma sintaxe própria. O CSS consiste em uma linguagem utilizada, para determinar como os documentos são apresentados aos usuários, ou seja, o CSS define a aparência ou estilo do programa. Por fim, o JavaScript é uma linguagem de programação baseada em scripts, no qual apenas o navegador interpreta. É uma linguagem dinâmica, orientada a objetos e criada com sintaxe próxima da linguagem C.

Todas essas linguagens integradas proporcionam que o sistema seja flexível e que possa ser acessado de um navegador (*web browser*), possibilitando mais mobilidade, já que pode ser acessado de qualquer lugar que possua conexão à internet, conferindo maior liberdade com alto desempenho. A utilização de Banco de Dados permite o armazenamento e um excelente controle integrado das informações.

A Figura 1 expõe, de forma bastante clara e simples, uma visão geral do sistema proposto, por meio de um diagrama. Neste, pode-se observar as principais funcionalidades permitidas ao usuário do sistema.

Desta forma, através do programa, o usuário pode, dentre outras funcionalidades expostas no diagrama, estimar a capacidade de carga e dimensionar estruturalmente as estacas submetidas a esforços de tração e compressão.

Figura 2 - Diagrama das funcionalidades do sistema.



4.1 Cálculo de capacidade de carga

O programa determina a carga admissível, total, lateral e de ponta em estacas escavadas, pré-moldadas e cravadas. O cálculo é realizado de forma automática, por meio da implementação numérica dos métodos de Aoki-Velloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978).

Inicialmente o usuário deverá cadastrar os parâmetros do SPT. O usuário informará o valor do SPT e o tipo de solo para cada metro de profundidade. Na Figura 3, apresenta-se a interface do programa para o cadastro da sondagem.

Figura 3 - Tela de cadastro de sondagem de simples reconhecimento

Profundidade (m)	Nº SPT	Areia	Areia silteosa	Areia silto-argilosa	Areia argilosa	Areia argilo-silteosa	Silte	Silte arenoso	Silte argilo-arenoso	Silte argiloso	Silte argilo-arenoso	Argila	Argila arenosa	Argila argilo-silteosa	Argila silteosa	Argila silto-arenosa
1	<input type="text"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2	<input type="text"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3	<input type="text"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
4	<input type="text"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
5	<input type="text"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6	<input type="text"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
7	<input type="text"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Na Figura 4, exibe-se a área de interação do software contendo as informações necessárias para a estimativa da capacidade de carga das estacas; são eles:

- SPT;
- Tipo de estaca;
- Geometria (quadrada, circular, trilho ou perfil). Caso a geometria seja quadrada, o usuário informa o valor de um dos lados, se circular, informará o diâmetro. Na hipótese em que a estaca for do tipo metálica, a geometria será perfil ou trilho;
- Cota de assentamento;
- Considerar o primeiro metro de atrito lateral.

Ao preencher os campos desta tela e clicar no botão “Calcular”, o programa estima automaticamente a capacidade de carga da estaca. O software apresenta os resultados, metro

a metro, da capacidade geotécnica das estacas pelos métodos desenvolvidos por Aoki-Velloso (1975) e Decourt-Quaresma (1978).

Ainda, o programa exibe um quadro-resumo dos dois métodos de cálculo e um gráfico que representa a capacidade de carga das estacas ao longo da profundidade do fuste.

Figura 4 - Informações da estaca para cálculo de capacidade de carga

Cálculo de capacidade de carga por SPT

SPT: [Selecionar SPT](#)

Tipo de Estaca:

Geometria:

Cota de apoio (m):

☐ Considerar 1* metro do atrito lateral.

[Cancelar](#) [Calcular](#)

4.2 Dimensionamento da estaca na tração e na compressão

O programa realiza o dimensionamento da armação de estacas de fundações profundas, informando a armadura necessária para que o elemento estrutural de concreto resista aos esforços de tração e compressão. É importante ressaltar que o sistema determina e dimensiona estacas armadas com índice de esbeltez (λ) menor ou igual a 40, considerando-se, assim, completamente enterradas.

Na Figura 5, pode-se observar a ilustração do programa mostrando os dados a serem inseridos para o dimensionamento dos esforços de tração e compressão; são eles: tipo de estaca, carga de compressão, tração, atrito lateral existente, resistência característica do concreto (f_{ck}), diâmetro da estaca, comprimento da fundação e diâmetro do aço.

Figura 5 - Dimensionamento de estaca aos esforços de tração e

Informações da estaca para dimensionamento

Tipo de Estaca: Broca

Compressão (tf): 150

Tração (tf): 10

Atrito Lateral (tf): 60

Diâmetro (cm): 33

Altura (m): 18

fck (Mpa): 20

Aço Principal: 12.5

Cancelar Calcular

Resultados

TENSÃO NA ESTACA:	17,54 MPa
AS DE COMPRESSÃO:	39,86 cm ²
AS MINIMO DE COMPRESSÃO:	0,35 cm ²
AS DE TRAÇÃO:	6,00 cm ²
AS MINIMO DE TRAÇÃO:	4,28 cm ²
COMPRIMENTO A SER ARMADO:	18,00 m
VOLUME DE CONCRETO:	1,54 m ³

Memória de cálculo

Os resultados do dimensionamento também são mostrados na Figura 5, em que o programa exibe a área de aço necessária para a estaca suportar os esforços.

5 VALIDAÇÃO E RESULTADOS

Para verificar se o programa está funcionando de acordo com as formulações e preceitos estabelecidos na fundamentação teórica, minimizando a probabilidade de existirem erros, será feita a validação por meio de cálculos de capacidade de carga e dimensionamento já conhecidos.

5.1 Validação da capacidade de carga

Para essa validação serão utilizados os valores de capacidade de carga de estacas, obtidos em Ferreira e outros (2014).

A partir do relatório de sondagem em anexo, realizou-se os cálculos, nos quais se obteve os seguintes resultados:

Tabela 7 - Valores de capacidade de carga obtidos pelo programa

Tipo de estaca	Ø (cm)	Aoki-Velloso			Décourt-Quaresma		
		PP (tf)	PL (tf)	P _{adm} (tf)	PP (tf)	PL (tf)	P _{adm} (tf)
Escavada	32	46,91	37,20	42,06	38,60	17,51	21,89
Pré-moldada	40	146,61	93,01	119,81	120,64	81,26	92,67
Strauss	40	43,98	26,10	32,62	39,37	18,12	22,65
Hélice contínua	50	103,08	48,93	61,17	36,91	36,30	36,61
Franki	35	161,88	27,40	34,25	241,53	25,41	31,76

Tabela 8 - Valores de capacidade de carga obtidos por Ferreira e outros (2015)

Tipo de estaca	Ø (cm)	Aoki-Velloso			Décourt-Quaresma		
		PP (tf)	PL (tf)	P _{adm} (tf)	PP (tf)	PL (tf)	P _{adm} (tf)
Escavada	32	46,91	37,20	42,06	38,60	17,10	22,8
Pré-moldada	40	146,61	93,01	119,81	120,64	42,75	63,05
Strauss	40	43,98	26,09	35,04	39,37	14,48	20,99
Hélice contínua	50	103,08	48,93	76,01	36,91	36,20	36,56
Franki	35	161,88	27,40	94,64	241,53	25,35	79,88

Na Tabela 7, apresentam-se os resultados obtidos pelo programa, e na Tabela 8 os valores da solução de Ferreira e outros (2014), para os métodos de Aoki-Velloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978).

As estacas escavadas e pré-moldadas foram assentadas na cota 14 m, enquanto as demais na cota de 11 m.

Para todas as estacas não houve diferenças entre os valores esperados para carga de ponta e lateral no método de Aoki-Velloso (1975). A discrepância entre os resultados da carga admissível nas estacas, está associada à verificação do item 8.2.1.2 da NBR 6122/2010 empregada pelo programa e não realizada por Ferreira e outros (2014). Essa verificação é a favor da segurança, visto que considera que a carga de ponta só poderá suportar o máximo de 20% da capacidade de carga admissível.

Entretanto, para o método de Décourt-Quaresma (1978), verifica-se uma diferença nos resultados obtidos para o atrito lateral das estacas. Essa diferença decorre da metodologia de cálculo utilizada, visto que Ferreira e outros (2014) desconsideram os dois primeiros metros do atrito lateral da estaca; contudo, não foi encontrada em nenhuma bibliografia pesquisada essa recomendação. Além disso, verifica-se que o autor supracitado aplica para todo o fuste

apenas um valor β (coeficiente de majoração ou minoração para cada tipo de solo), enquanto o programa emprega um valor de β para o tipo de solo de cada extrato.

Ainda, pode-se verificar que nos dois resultados o método de Décourt-Quaresma (1978) apresentou-se mais conservador do que o método de Aoki-Velloso (1975).

5.2 Validação do dimensionamento estrutural

Para a validação do dimensionamento estrutural de estacas, serão feitos no tópico a seguir dois exemplos de dimensionamento apresentados em literatura renomada no meio técnico.

5.2.1 Exemplo de aplicação 01

Será utilizado o exercício resolvido 02, que se encontra em Alonso (2012, p. 18). Dados do problema: carga de compressão de 2800 kN; diâmetro da estaca de 80 cm; f_{ck} de 16 MPa e aço CA 50. Como resultado proposto por Alonso (2012), obteve-se:

$$\sigma = 5,6 \text{ MPa}$$

$$z \text{ (comprimento a ser armado)} = 6 \text{ m}$$

$$A's \leq 0 \text{ usar amadura mínima}$$

$$A's \text{ min} = 25 \text{ cm}^2$$

Os resultados obtidos pelo sistema podem ser visualizados na Figura 6.

Figura 6 - Resultados obtidos pelo programa.

Resultados	
TENSÃO NA ESTACA:	5,58 MPa
AS DE COMPRESSÃO:	0,00 cm ²
AS MINIMO DE COMPRESSÃO:	25,14 cm ²
AS DE TRAÇÃO:	0,00 cm ²
AS MINIMO DE TRAÇÃO:	0,00 cm ²
COMPRIMENTO A SER ARMADO:	6,00 m
VOLUME DE CONCRETO:	10,06 m ³

Ao verificar os resultados, pode-se constatar que existiram pequenas diferenças entre os valores obtidos e os valores esperados para o dimensionamento à compressão da estaca proposta. Estas diferenças podem ser consideradas como perdas devido às aproximações.

5.2.2 Exemplo de aplicação 02

Será utilizado o exercício resolvido 04, que se encontra em Alonso (2012 p. 21). Para este exemplo, só calcularemos a armadura de tração. Dados do problema: carga de tração 180 kN; diâmetro da barra 10 mm; f_{ck} de 30 MPa e fissuras com abertura máxima de 0,1 mm.

Como resultado proposto por Alonso (2012), obteve-se uma área de aço para resistir aos esforços de tração de 9,1 cm². Os resultados obtidos pelo sistema podem ser visualizados na Figura 7.

Figura 7 - Resultados de armadura de tração obtidos pelo programa

Resultados	
TENSÃO NA ESTACA:	3,98 MPa
AS DE COMPRESSÃO:	0,00 cm ²
AS MINIMO DE COMPRESSÃO:	25,14 cm ²
AS DE TRAÇÃO:	8,43 cm ²
AS MINIMO DE TRAÇÃO:	0,35 cm ²
COMPRIMENTO A SER ARMADO:	18,00 m
VOLUME DE CONCRETO:	9,05 m ³

Ao analisar os resultados, pode-se constatar que houve uma diferença de cerca de 7,36% menor do resultado do programa comparado com o exemplo. Essa diferença é justificada pelo método de cálculo adotado por Alonso (2012), para determinar a resistência característica média do concreto à tração, visto que o autor não utiliza a equação indicada pela NBR 6110/2014. A fórmula utilizada pelo autor é:

$$\begin{aligned}
 f_{tcm} &= \frac{f_{ck}}{10} \text{ para } f_{ck} \leq 18 \text{ MPa} \\
 f_{tcm} &= 0,6 f_{ck} + 0,7 \text{ para } f_{ck} > 18 \text{ MPa}
 \end{aligned}
 \tag{Eq.[21]}$$

Enquanto isso, o sistema utiliza-se das recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

A rotina computacional desenvolvida favorece o aumento da produtividade e eficiência no desenvolvimento de projeto de fundações.

Os resultados apresentados pelo programa mostraram-se válidos tanto para o cálculo de capacidade de carga, quanto para o dimensionamento aos esforços de tração e compressão. Com isso, espera-se que este seja utilizado por estudantes e profissionais de engenharia, na medida em que se caracteriza como uma ferramenta computacional simples, de fácil utilização e rápida obtenção de dados, podendo ser acessada de qualquer lugar com internet disponível.

Como sugestões de trabalhos futuros, pode-se enumerar:

- a) Implementação do dimensionamento estrutural de estacas submetidas a esforços transversais e momentos.
- b) Desenvolvimento de rotina para determinar o atrito negativo causado por uma camada de solo compressível combinado ou não com uma camada de sobrecarga.
- c) Implementação do recalque por encurtamento elástico do fuste da estaca e o recalque devido à deformação do solo.
- d) Desenvolvimento de outros métodos para cálculo de capacidade de carga e tratamento estatístico dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

ALONSO, Urbano Rodrigues. **Dimensionamento de fundações profundas**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2012.

ALONSO, Urbano Rodrigues. **Exercícios de Fundações**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2010.

ARAÚJO, Renato Silva; WOLLE, Cláudio Michael. Proposta de Adequação de uma Metodologia Consagrada para a Estimativa da Capacidade de Carga de Estacas para Estacas Mega de Concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA (COBRAMSEG), 13., 2006, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, Brasil, 1996.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado** – Segundo NBR 6118: 2003. 3 ed. São Carlos: EdUFSCar, 2013.

CINTRA, José Carlos A.; AOKI, Nelson. **Fundações por estacas: projeto geotécnico**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

DECOURT, L.; et al. Análise e Projeto de fundações profundas. In: **Fundações, Teoria e Prática**. Ed. Pini/ABMS/ABEF, 1996. cap. 8, p. 265-327.

FERREIRA, Tobias Ribeiro et al. Rotina computacional para previsão de capacidade de carga em estacas. **REEC – Revista Eletrônica de Engenharia**, Goiânia. v. 8, n. 3. p. 38-50. dez. 2014.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar métodos de pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GONÇALVES, Sérgio Fernandes. **Estudo do comportamento à compressão de estacas metálicas curtas em solo sedimentar**. 2008. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria – Centro de Tecnologia, Santa Maria, RS, 2008.

HACHICH, W. et al. **Fundações: Teoria e Prática**. 2 ed. São Paulo: Ed. PINI, 1998.

LOBO, Bianca de Oliveira. **Método de previsão de capacidade de carga de estacas: aplicação dos conceitos de energia no ensaio SPT**. 2005. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Escola de Engenharia, Porto Alegre, RS, 2005.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. 5 ed. São Paulo: Atlas, 2003.

POLILLO, Adolpho. **Dimensionamento de Concreto Armado**. 4. ed. São Paulo: Livraria Nobel S.A. Editora, 1981. (v. 2)

QUARESMA, A. R. et al. **Investigações geotécnicas**. Fundações teoria e prática. São Paulo: Pini, 1998. 43 p.

VELLOSO, Dirceu de Alencar; LOPES, Francisco de Rezende. **Fundações**. Fundações Profundas. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. (v. 2).